

MilliNewton : capteurs avec amplification de type "Kolbasi"

Premiers tests des capteurs de force MilliNewton utilisant les circuits d'amplification alternatifs de type "Kolbasi 1" et "Kolbasi 2".

Erste Tests der MilliNewton-Kraftsensoren mit alternativen Verstärkungsschaltungen Typ "Kolbasi 1" und "Kolbasi 2".

Thomas Maeder, 5.9.2001

Projets: MilliNewton, TEPLAZID-ajustement, brasure métallique.

Mots-Clefs: ajustement capteurs, TCO, stabilité, brasure, contraintes, électronique, Kolbasi.

Table des matières

1. Introduction	2
2. Expériences	4
3. Capteurs à l'état ajusté	7
4. Stabilité des capteurs	11
5. Conclusions	14

Résumé

Les circuits d'amplification de type Kolbasi 1 et Kolbasi 2 constituent à première vue des alternatives viables au circuit standard de type DT400 utilisé dans le capteur de force MilliNewton. Notamment, le type Kolbasi 2 est particulièrement facile et simple à ajuster. La stabilité de l'offset de tous les types est insuffisante. La cause la plus probable est l'évolution des contraintes dans la brasure.

Kurzfassung

Die Verstärkerschaltungen Kolbasi 1 und Kolbasi 2 sind anscheinend passende Alternative zur üblichen DT400-Schaltung, die im MilliNewton-Kraftsensor eingesetzt wird. Der Abgleich von Typ Kolbasi 2 ist besonders leicht und einfach. Die Stabilität des Offsets aller Typen ist noch ungenügend. Änderungen in den Spannungen im Weichlot bilden die wahrscheinlichste Ursache dafür.

1. Introduction

Deux électroniques alternatives au circuit utilisé par Huba Control pour son capteur de pression "DT 400" ont été proposées par Adnan Kolbasi¹ dans le cadre d'un projet de diplôme HES (FHA-Aargau). Contrairement au circuit DT400, ces deux électroniques se basent sur le fait que la cellule de mesure (fig. 1–1) et l'amplification (fig. 1–2) sont intégrées dans le même produit, ce qui permet des améliorations ou des simplifications.

- 1) Une variante, "Kolbasi 1", n'utilise qu'un amplificateur opérationnel (la moitié d'un LM358). De plus, ce circuit est très simple, et aucun ajustement passif n'est en principe nécessaire. La sortie auxiliaire S' donne la tension de la branche positive du pont de mesure U_2 .
- 2) L'autre variante, "Kolbasi 2", utilise deux amplificateurs. L'amplificateur économisé par rapport au circuit "DT400" est utilisé pour permettre l'ajustement du gain après celui de l'offset, les deux ajustements étant idéalement indépendants. L'amplification du signal est réalisée en cascade, les deux gains étant grosso modo multipliés. Ce circuit, bien que plus complexe que le précédent, est séparable en deux parties simples : une pré-amplification à gain fixe (configurable par découpe de pistes réalisée lors de la phase d'ajustement passif), et une amplification finale dont on règle le gain pour ajuster le span du capteur. La sortie auxiliaire S' donne ici la sortie de l'étage de pré-amplification.

Sur le circuit DT400, l'offset et le span sont influencés de manière complexe par un grand nombre de résistances. On escompte une identification beaucoup plus facile des causes d'instabilité avec les circuits Kolbasi, étant donné la simplicité de Kolbasi 1, de la séparation de gain et offset de Kolbasi 2, ainsi que l'information supplémentaire donnée par la sortie auxiliaire. En outre, les circuits Kolbasi présentent quelques caractéristiques supplémentaires.

- On peut augmenter et réduire le gain, contrairement à DT400, où celui-ci ne peut être que réduit.
- Le prix à payer pour la simplification / l'amélioration est une rétroaction de la sortie d'un amplificateur sur la sortie négative $s-$ du pont de mesure. L'impédance de sortie de cette borne entre donc dans le dénominateur du gain. Dans le cadre d'un produit intégré, ce fait ne pose en principe pas de problème, car on peut intégrer cette impédance dans les calculs.

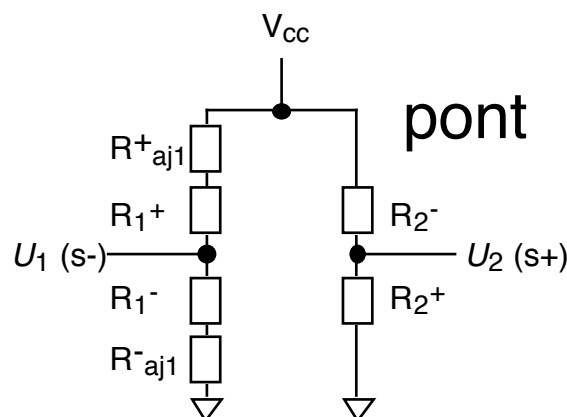


Figure 1–1. Le pont de mesure sur cette version (v2) de la poutre. Pour les électroniques Kolbasi, il est préférable de placer les résistances d'ajustement grossier de l'offset sur la branche 2 (positive) du pont, ce qui diminue la dispersion des gains non ajustés.

¹ A. Kolbasi, "Low-Cost Hybridverstärker für Keramikdrucksensoren", travail de diplôme, FHA-Aargau, 1999.

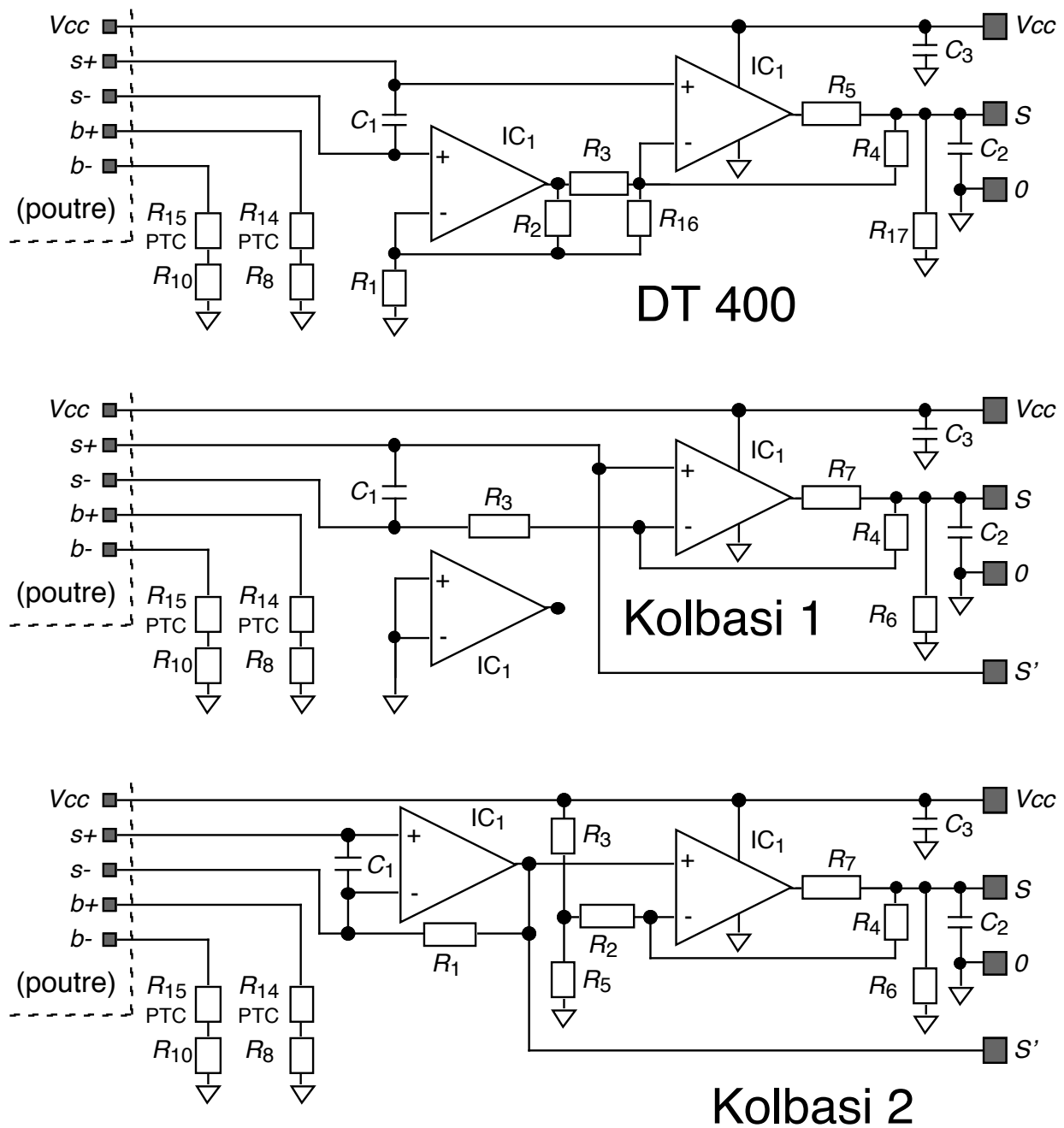


Figure 1–2. Les 3 électroniques d'amplification, DT400, Kolbasi 1 et Kolbasi 2.

Noter que pour les Kolbasi, il y a rétroaction sur la sortie négative (s-), et que l'impédance de sortie de cette borne du pont de mesure entre donc dans le dénominateur du gain.

2. Expériences

Fabrication et ajustement

La poutre (ici d'épaisseur 0.25 mm) et l'embase, ainsi que leur processus de fabrication et celui du capteur complet, sont décrits in extenso dans les rapports précédents^{2 3 4}. Le dernier rapport⁴ donne les détails sur le processus de fabrication actuel. Dans le présent travail, cependant, 5 variantes de capteurs ont été fabriqués, selon le tableau 2–I. Les valeurs des composants et des résistances sont donnés aux tableaux 2–II à 2–IV.

- 1) La variante standard, avec électronique de type DT400. Elle est identique à la série 63xx⁴, mais avec un ajustement passif de l'embase non stabilisé thermiquement, et ce dans tous les cas.
- 2) La variante avec électronique de type Kolbasi 1, mais avec un span non ajusté. Ces capteurs permettent d'évaluer la seule stabilité de la cellule de base (poutre), ainsi que de l'ajustement fin de l'offset et celui du coefficient en température.
- 3) La variante avec électronique de type Kolbasi 1 comme ci-dessus, mais avec un ajustement complet.
- 4) La variante avec électronique de type Kolbasi 2, avec le 1^{er} étage d'amplification configuré en gain maximal (valeur max. de R_1 , env. 280 k Ω , gain env. 70...80).
- 5) La variante avec électronique de type Kolbasi 2, avec le 1^{er} étage d'amplification configuré en gain minimal (valeur min. de R_1 , env. 140 k Ω , pas de pistes coupées, gain env. 35...40).

Les embases pour les variantes Kolbasi sont différentes du point de vue du recuit après ajustement passif, ce qui n'est pas un problème : l'ajustement passif ne concerne que des résistances de filtrage (Kolbasi 1), voire est inexistant (Kolbasi 2).

L'ajustement actif des capteurs est réalisé selon la procédure courante⁵. Le principe d'ajustement en offset et en span a été exposé précédemment pour chaque type d'électronique^{6 7 8}. Un point à noter est l'ajustement du TCO ⁹ des Kolbasi 2 ; alors que les DT400 et Kolbasi 1 sont ajustés sur la sortie finale, les Kolbasi 2 ne le sont que sur l'étage intermédiaire d'amplification, ce qui évite largement les problèmes de saturation et accélère donc l'ajustement, mais peut introduire une imprécision additionnelle.

Nos de série	Electronique	Variante / notes
6230-6248	DT400	ajustement normal, version "standard" de MilliNewton
6400-6404	Kolbasi 1	span non ajusté
6405-6409	Kolbasi 1	ajustement normal
6410-6413	Kolbasi 2	ajustement normal, configuré en gain maximal du 1 ^{er} étage
6415-6419	Kolbasi 2	ajustement normal, configuré en gain minimal du 1 ^{er} étage

Tableau 2–I. Caractéristiques des 5variantes de capteurs.

² Rapport "Ajustement des capteurs MilliNewton, 2^e version", T. Maeder, 11.6.2001.

³ Rapport "Ajustement et verrage des poutres MilliNewton, version 2", T. Maeder, 5.6.2001.

⁴ Rapport "MilliNewton : effet de la stabilisation de l'embase", T. Maeder, 28.8.2001.

⁵ Procédure "Ajustement laser des capteurs de force MilliNewton", T. Maeder, 27.8.2001.

⁶ Référence "Ajustement de l'électronique de type Huba DT 400", T. Maeder, 15.5.2000.

⁷ Référence "Ajustement de l'électronique de type Kolbasi 1", T. Maeder, 15.5.2000.

⁸ Référence "Ajustement de l'électronique de type Kolbasi 2", T. Maeder, 15.5.2000.

⁹ Référence (préliminaire) "Capteurs piézorésistifs à couches épaisses - bases de calcul", ch. 4. T. Maeder, 9.11.2000.

Composant	Désignation ou composition	Valeur	Notes
IC ₁	LM358		amplificateur opérationnel double
C ₁	(céramique)	10 nF	filtrage du pont de mesure
C ₂	(céramique)	10 nF	filtrage de la sortie du capteur
C ₃	(céramique)	47 nF	découplage de l'alimentation
R ₁ et R ₄	DP 2051	100 kΩ (P)	amplification (numérateur du gain)
R ₂ et R ₃	DP 2041	10 kΩ (P)	amplification (dénominateur, avec R ₁₆)
R ₅	DP 2021	200 Ω (P)	filtrage de la sortie du capteur
R ₈ et R ₁₀	DP 2021	150...600Ω (A)	offset fin (+ et -)
R ₁₄ et R ₁₅	ESL 2612	80...400Ω (A)	TCO (+ et -)
R ₁₆	DP 2021	50...1500Ω (A)	span (dénominateur)
R ₁₇	DP 2051	200 kΩ (P)	filtrage de la sortie du capteur

Tableau 2-II. Liste des composants pour l'électronique DT400.
(P) = ajustement passif ; (A) = ajustement actif – valeurs indicatives.

Composant	Désignation ou composition	Valeur	Notes
IC ₁	LM358		amplificateur opérationnel double
C ₁	(céramique)	10 nF	filtrage du pont de mesure
C ₂	(céramique)	0 nF	filtrage de la sortie du capteur : coupé
C ₃	(céramique)	47 nF	découplage de l'alimentation
R ₃	DP 2041	2...20 kΩ (A)	span : dénominateur du gain
R ₄	DP 2051	1...3 MΩ (A)	span : numérateur du gain
R ₆	DP 2051	200 kΩ (P)	filtrage de la sortie du capteur
R ₇	DP 2021	0 Ω	filtrage : court-circuité
R ₈ et R ₁₀	DP 2021	150...600Ω (A)	offset fin (+ et -)
R ₁₄ et R ₁₅	ESL 2612	80...400Ω (A)	TCO (+ et -)

Tableau 2-III. Liste des composants pour l'électronique Kolbasi 1.
(N) = non ajusté ; (P) = ajustement passif ; (A) = ajustement actif – valeurs indicatives.

Composant	Désignation ou composition	Valeur	Notes
IC ₁	LM358		amplificateur opérationnel double
C ₁	(céramique)	10 nF	filtrage du pont de mesure
C ₂	(céramique)	0 nF	filtrage de la sortie du capteur : coupé
C ₃	(céramique)	47 nF	découplage de l'alimentation
R ₁	DP 2051	140...280 kΩ (C)	numérateur du gain (1 ^{er} étage)
R ₂	DP 2041	5...20 kΩ (A)	span : dénominateur du gain
R ₃	DP 2041	3...20 kΩ (A)	diviseur résistif (bas, offset 2 ^e étage)
R ₄	DP 2051	40...300 kΩ (A)	span : numérateur du gain
R ₅	DP 2051	30...200 kΩ (A)	diviseur résistif (haut, offset 2 ^e étage)
R ₆	DP 2051	150 kΩ (N)	filtrage de la sortie du capteur
R ₇	DP 2021	0 Ω	filtrage : court-circuité
R ₈ et R ₁₀	DP 2021	150...600Ω (A)	offset fin (+ et -)
R ₁₄ et R ₁₅	ESL 2612	80...400Ω (A)	TCO (+ et -)

Tableau 2–IV. Liste des composants pour l'électronique Kolbasi 2. (N) = non ajusté ; (C) = ajustement par coupe de pistes seulement ; (A) = ajustement actif – valeurs indicatives.

Traitements et mesures

Après fabrication, l'offset et le span des capteurs a été mesuré régulièrement dans le temps, automatiquement dans le laser en utilisant le posage d'ajustement actif. Les sollicitations apportées (A–C ci-dessous) et les mesures sont similaires à l'étude précédente⁴, avec toutefois un programme légèrement différent.

De plus, les DT400 et les Kolbasi ne sont pas absolument comparables, la série 62xx (DT400) ayant été montée et ajustée considérablement plus tôt (1500 h) avant montage des pattes SIL, contre seulement 28 h et 45 h pour les Kolbasi.

- A) Mesure du TCO : chauffage quelques min jusqu'à 70 C, assez brutal (pose sur porte-substrat chaud).
- B) Montage des pattes SIL : trempe brutale de l'extrémité du capteur dans un bain Pb–Sn à env. 240 C, quelques secondes.
- C) Burn-in 54h à 80 C, env. 70h après montage des SIL.

La liste chronologique des mesures est donnée au tableau 2–V.

Mesure	Temps	Note
1	ajustement + env. 1 h	
2	ajustement + 28, 45 ou 1500 h	1500 h : 62xx 45 h : 6400-6404 ; 6410-6412 28 h : 6405-6409 ; 6415-6419
3	B + 3 h	B) SIL : 240 C qq s dans bain Pb-Sn
4	B + 70 h	
5	C + 0.5 h	C) burn-in 80 C 54h en étuve
6	C + 200 h	

Tableau 2–V. Liste des mesures.

3. Capteurs à l'état ajusté

3.1. Précision d'ajustement de l'offset et du span

Les déviations de l'offset et du span par rapport aux valeurs nominales sont données pour les capteurs de type Kolbasi à la fig. 3–1. Pour les DT400, on obtient sensiblement les mêmes résultats que pour les études précédentes.

Pour les deux variantes, la précision d'ajustement de l'offset est bonne. En revanche, celle du span sur les Kolbasi 1 (6405–6409) laisse à désirer ; l'ajustement du span devient d'autant plus imprécis que la sortie sous charge se rapproche de $V_{cc}/2$. Or, la méthode alternative d'ajustement consistant à fixer temporairement l'offset à $V_{cc}/2$ n'est pas pratique, en raison de la limite de saturation supérieure très basse de l'amplificateur LM358. La méthode donnant donc le plus de précision serait de fixer la sortie sous charge, puis à ajuster le span à l'état déchargé, ce qui ne pose en principe pas de problème.

L'ajustement le plus facile et le plus simple est obtenu avec les capteurs de type Kolbasi 2, où l'on peut d'abord ajuster l'offset, puis le span. Aucun problème n'a été constaté avec les imperfections de l'amplificateur, qui conduiraient à une variation de l'offset lorsqu'on ajuste le gain du 2^e étage d'amplification.

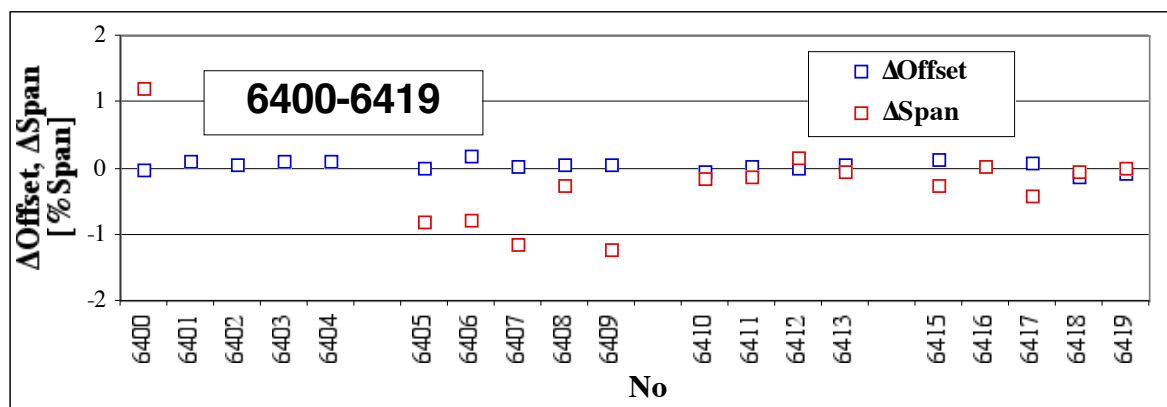


Figure 3–1. Déviations de l'offset et du span par rapport aux valeurs nominales.
 6400-6404 : Kolbasi 1 (span non ajusté) ; 6405-6409 : Kolbasi 1 (span ajusté)
 6410-6413 : Kolbasi 2 (gain 1^{er} étage élevé) ; 6415-6419 : Kolbasi 2 (gain 1^{er} étage faible).

3.2. Réponse des résistances de jauge

La réponse $span_x$ de la sortie auxiliaire S' des capteurs de type Kolbasi 1 correspond (voir schéma) à celle de la sortie positive de la poutre (s+), et donc à env. la moitié de la réponse r des résistances de jauge.

$$r \approx 2 \cdot span_x$$

r	réponse des résistances de jauge
$span_x$	span de la sortie auxiliaire

Les réponses estimées de la sorte sont montrées à la fig. 3–2 pour tous les capteurs de type Kolbasi 1. On obtient bien les 3 mV/V typiques pour la technologie hybride sur alumine. La réponse du pont de mesure complet se situe légèrement en dessous de cette estimation, car les résistances d'ajustement se trouvent essentiellement sur l'autre branche du pont et en diminuent légèrement la réponse.

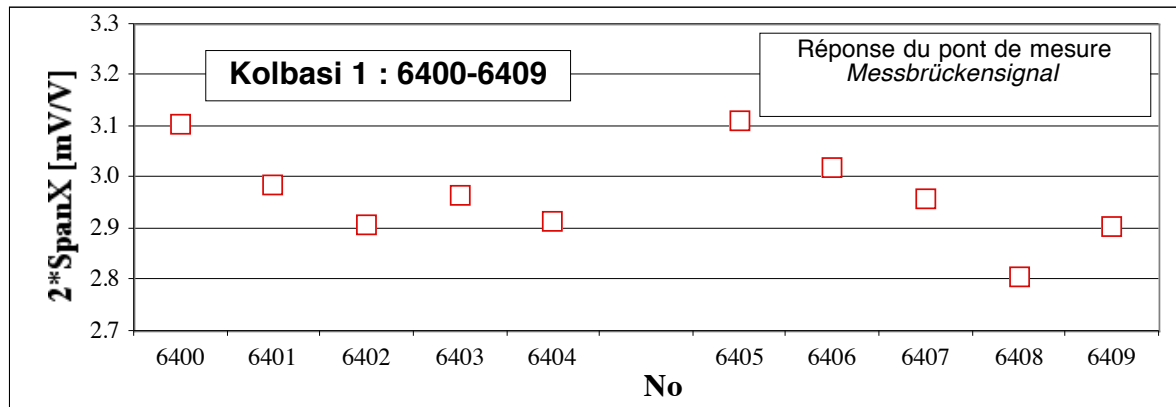


Figure 3–2. Réponse nominale des résistances de jauge sur la poutre, estimées à partir de la sortie auxiliaire des capteurs Kolbasi 1.

3.3. Span non ajusté des capteurs Kolbasi 1

La déviation du span par rapport à sa valeur nominale est donnée à la fig. 3–2 pour les 5 capteurs dont le span n'a pas été ajusté. Les valeurs obtenues sont favorables, le span se situant grosso modo à la valeur nominale sans ajustement.

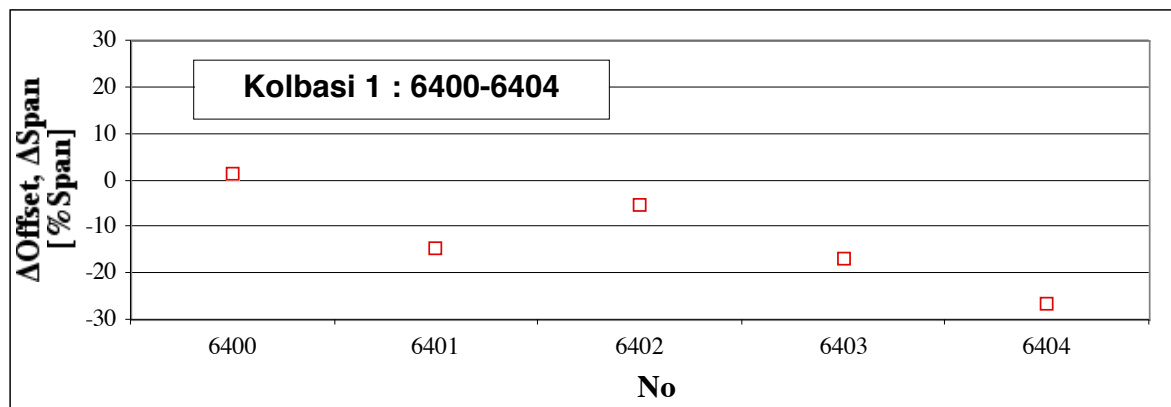


Figure 3–3. Déviation du span par rapport à sa valeur nominale, span non ajusté.

3.4. Span et gain des étages d'amplification des capteurs Kolbasi 2

La réponse nominale $span_x$ de la sortie auxiliaire S' des capteurs de type Kolbasi 2 est celle du 1^{er} étage d'amplification. Les valeurs obtenues sont montrées à la fig. 3–4. On obtient env. 0.2 pour R_1 configurée en gain élevé (env. 280 k Ω) et env. 0.1 pour R_1 configurée en gain faible (env. 140 k Ω). En admettant que la sortie du pont de mesure (diminuée par les résistances d'ajustement) se situe entre 2.5 et 2.8 mV/V, on obtient un gain entre 70 et 80 (élevé) ou entre 35 et 40 (faible) pour le 1^{er} étage. Suivant la configuration de R_1 , le gain du 2^e étage sera donc env. 3 (gain 1^{er} élevé) ou 6 (gain 1^{er} faible). A l'état non ajusté, il se situe à env. 5.5 (fig. 3–5). Rappelons que le gain peut être augmenté ou diminué dans le cas des capteurs Kolbasi.

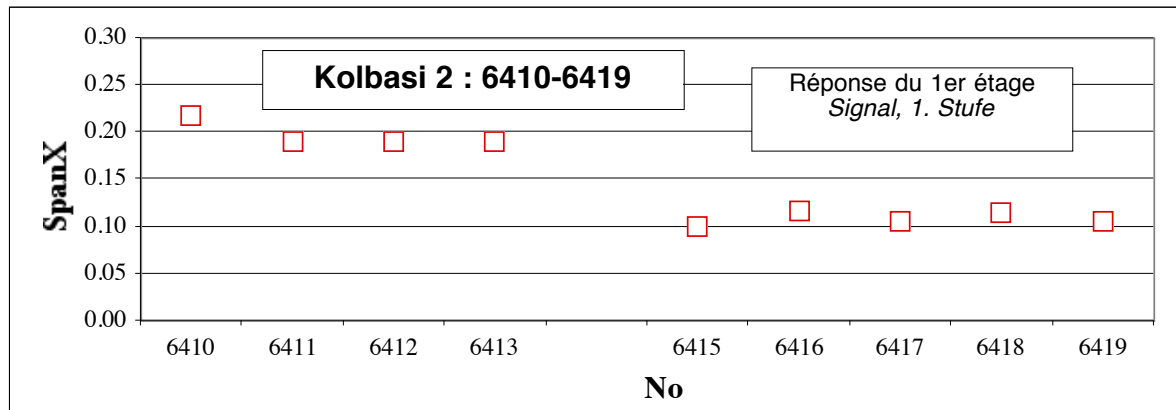


Figure 3–4. Réponse nominale du 1^{er} étage d'amplification des capteurs Kolbasi 2.
6410-6413 : R_1 configurée en gain élevé ; 6415-6419 : R_1 configurée en gain faible.

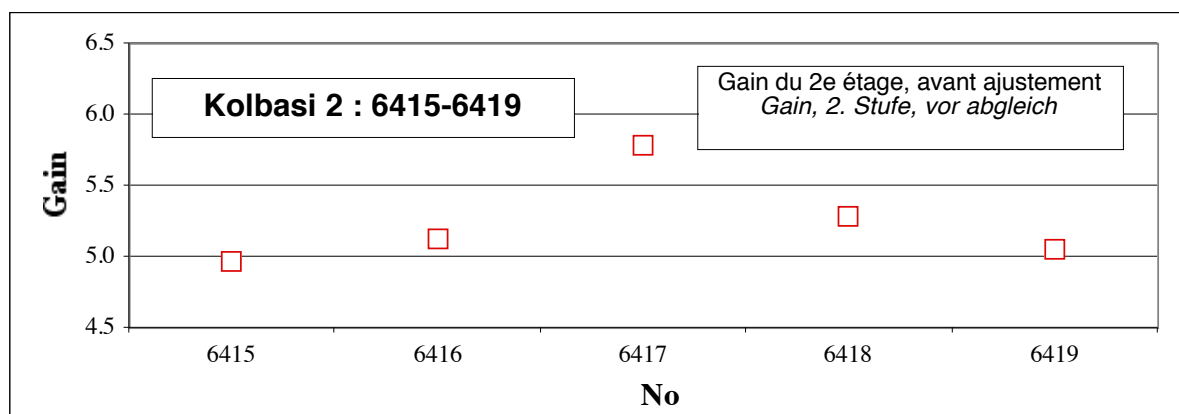


Figure 3–5. Gain non ajusté du 2^e étage d'amplification des capteurs Kolbasi 2.

3.5. Coefficients en température

Les histogrammes des coefficients en température de l'offset TCO et du span TCS des capteurs de type Kolbasi sont donnés aux figures 3–6 et 3–7. L'ajustement de TCO ne pose en principe pas de problème. Les valeurs de TCO trop faibles observées chez certains capteurs de type Kolbasi 1 sont dus au caractère préliminaire de cette étude et des programmes d'ajustement. Quant aux valeurs de TCS (non ajusté), elles correspondent à celles observées précédemment, à savoir env. $-0.03\%/K$. Les résultats observés avec le type Kolbasi 2 sont remarquablement bons, étant donnés que TCO est ajusté sur ce type sur la sortie du 1^{er} étage, et non sur la sortie finale. Cette façon de faire évite pratiquement tout problème de saturation de l'amplificateur lors de l'ajustement, et rend donc l'ajustement plus simple et plus rapide. Le fait que le 2^e étage d'amplification, à gain assez faible (3 ou 6 environ), n'introduit pratiquement pas de coefficients en température supplémentaires est confirmé par l'excellente corrélation entre les coefficients en température mesurés à la sortie des deux étages (fig. 3–8).

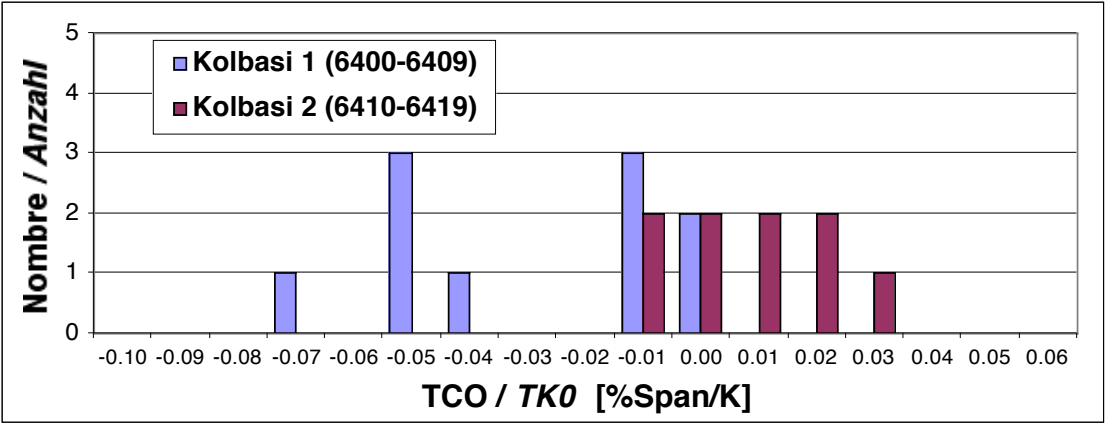


Figure 3-6. Histogramme des coefficients en température de l'offset TCO des capteurs Kolbasi ajustés.

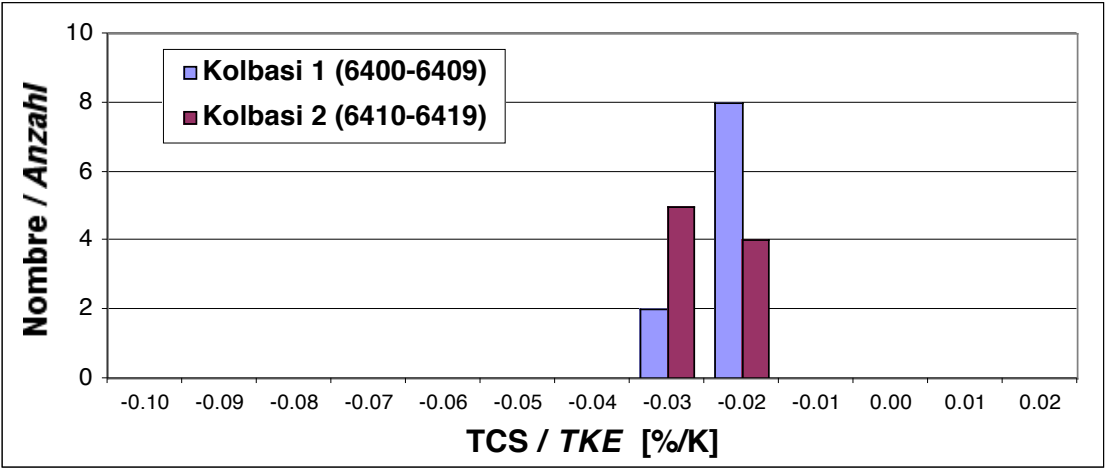


Figure 3-7. Histogramme des coefficients en température du span TCS des capteurs Kolbasi ajustés.

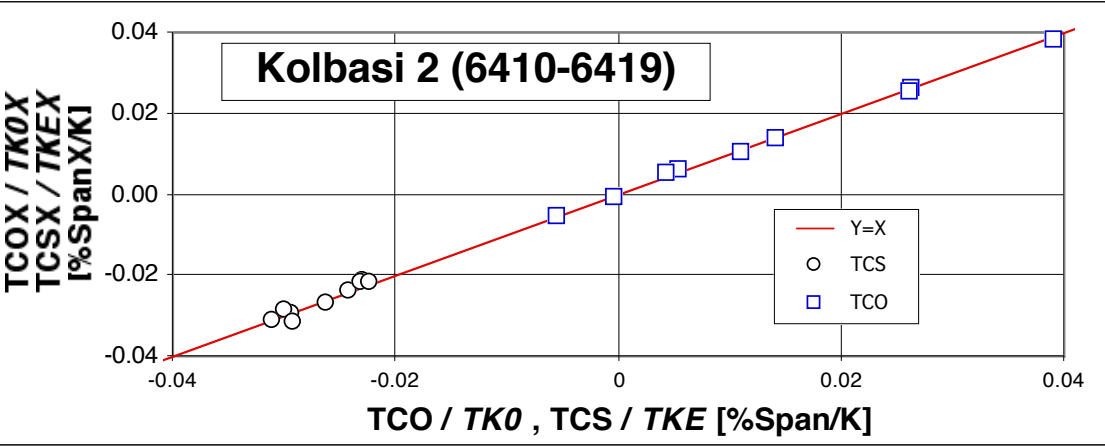


Figure 3-8. Kolbasi 2. Coefficients en température de la sortie du 1^{er} étage d'amplification (offset : TCO_X ; span : TCS_X), en fonction de ceux de la sortie finale du capteur (TCO et TCS).

4. Stabilité des capteurs

4.1. Stabilité du span

L'évolution du span au cours des tests de stabilité (voir tableau 2-V) est donnée à la fig. 4-1. Les variations observées semblent correspondre essentiellement à des fluctuations du dispositif de mesure. On peut donc considérer que le span reste essentiellement stable, ou du moins que sa variation n'est pas la cause principale de celle de l'offset.

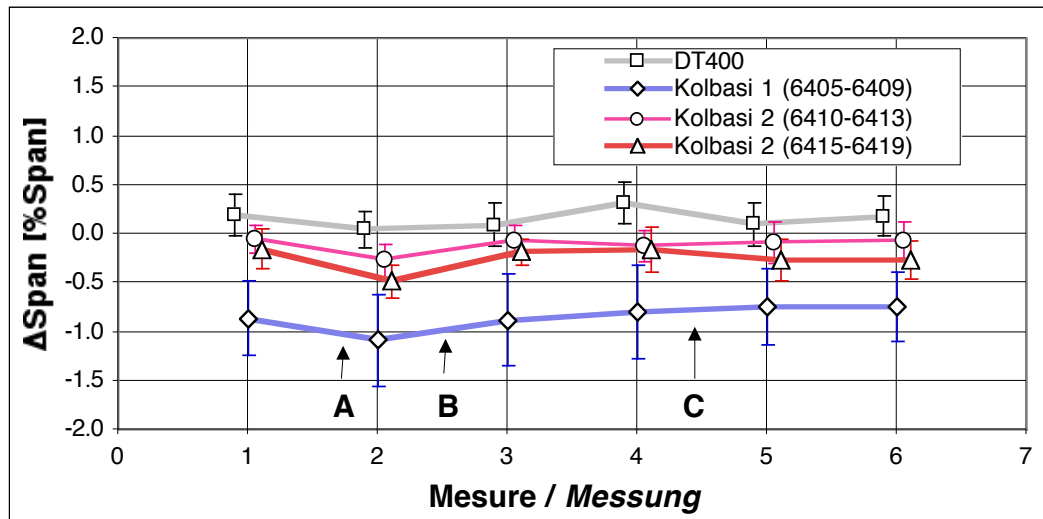


Figure 4-1. Evolution du span (déviations par rapport à la valeur nominale ; moyenne \pm écart-type) des capteurs.

4.2. Stabilité de l'offset : DT400

L'évolution de l'offset des DT400 au cours des tests de stabilité (voir tableau 2-V) est donnée à la fig. 4-2. Les résultats sont comparables à ceux des études précédentes, si on tient compte du temps élevé pour cette série entre les mesures 1 et 2 (1500 h). Pour presque tous les capteurs, on retrouve la tendance, déjà observée auparavant, à l'inversion de la déviation lors du burn-in à 80 C, suivie d'un retour progressif, ce qui est conforme à l'hypothèse que la variation des contraintes dans la brasure de la poutre (éventuellement de l'amplificateur) est en grande partie à l'origine de celle de l'offset.

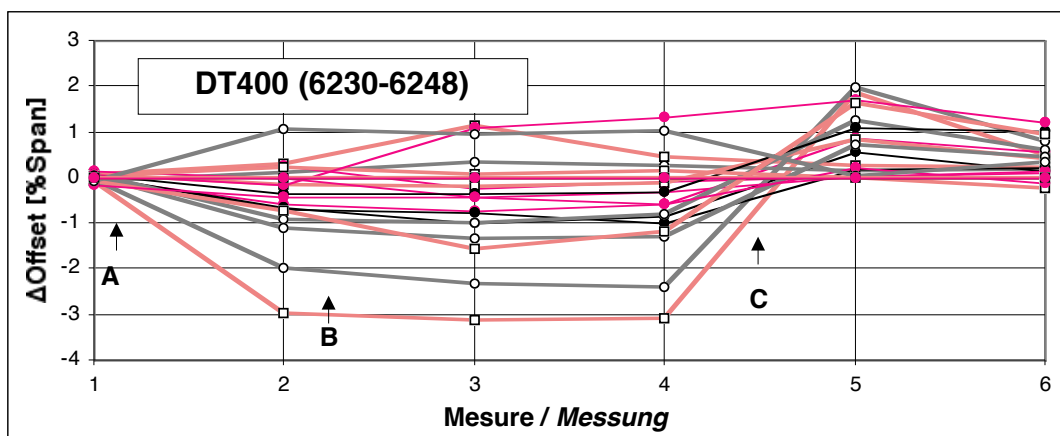


Figure 4-2. Evolution de l'offset (déviations par rapport à la valeur nominale) des capteurs DT400.

4.2. Stabilité de l'offset : Kolbasi 1

L'évolution de l'offset des Kolbasi 1 au cours des tests de stabilité (voir tableau 2–V) est donnée aux figures 4–3 et 4–4. L'offset des Kolbasi 1 dont le span a été ajusté semble augmenter légèrement après ajustement, ce qui pourrait correspondre à une légère diminution du gain, difficile à mesurer directement (la mesure du span est moins précise que celle de l'offset). L'instabilité entre les mesures 1 et 2 ne peut ici être comparée aux résultats obtenus avec DT400, les intervalles de temps étant trop différents.

Le burn-in à 80 C provoque une variation de l'offset (différente suivant le capteur), suivie d'un retour progressif, comme pour les DT400. Le fait qu'on observe pas d'inversion de l'écart initial est attribué au laps de temps trop court entre la fabrication et le burn-in ; les contraintes dans la brasure n'ont probablement pas eu le temps de se relaxer à température ambiante.

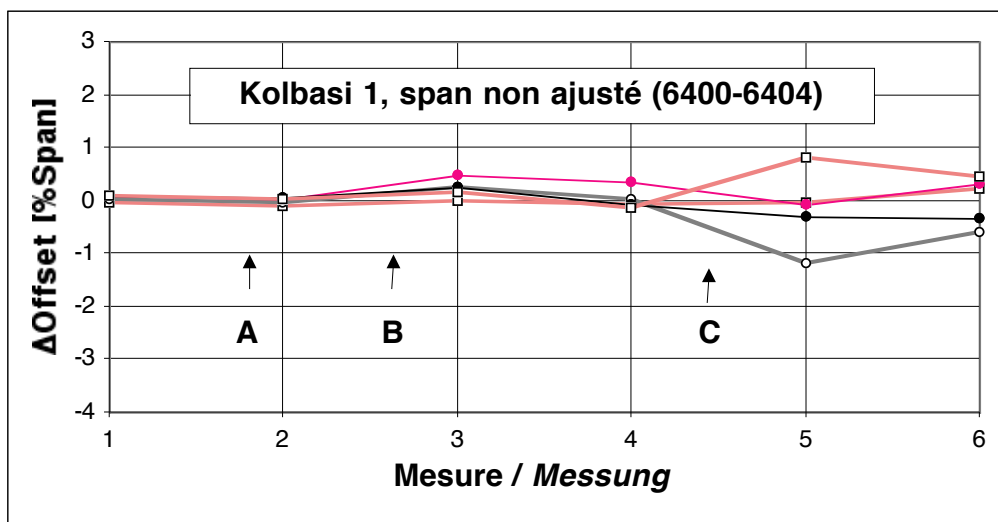


Figure 4–3. Evolution de l'offset (déviations par rapport à la valeur nominale) des capteurs Kolbasi 1 (span non ajusté).

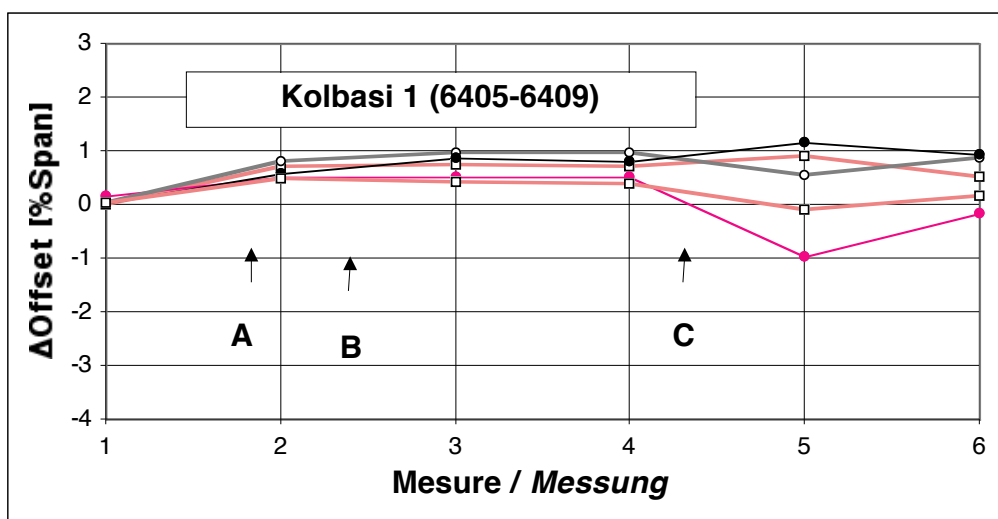


Figure 4–4. Evolution de l'offset (déviations par rapport à la valeur nominale) des capteurs Kolbasi 1 (span ajusté).

4.3. Stabilité de l'offset : Kolbasi 2

L'évolution de l'offset des Kolbasi 2 au cours des tests de stabilité (voir tableau 2–V) est donnée aux figures 4–5 et 4–6. Le comportement est globalement similaire à celui des Kolbasi 1. Il est difficile de comparer les variations de l'offset des différents types de capteurs lors du burn-in, le nombre de capteurs testés dans cette étude étant trop petit.

Si on rapporte les deux déviations de l'offset (1^{er} et 2^e étage) à leur span respectif pour toutes les mesures effectuées au cours des tests de stabilité sur tous les capteurs de type Kolbasi 2, on observe une excellente corrélation (fig. 4–7). L'instabilité de l'offset de la sortie des capteurs Kolbasi 2 est donc déjà présente à la sortie du 1^{er} étage d'amplification.

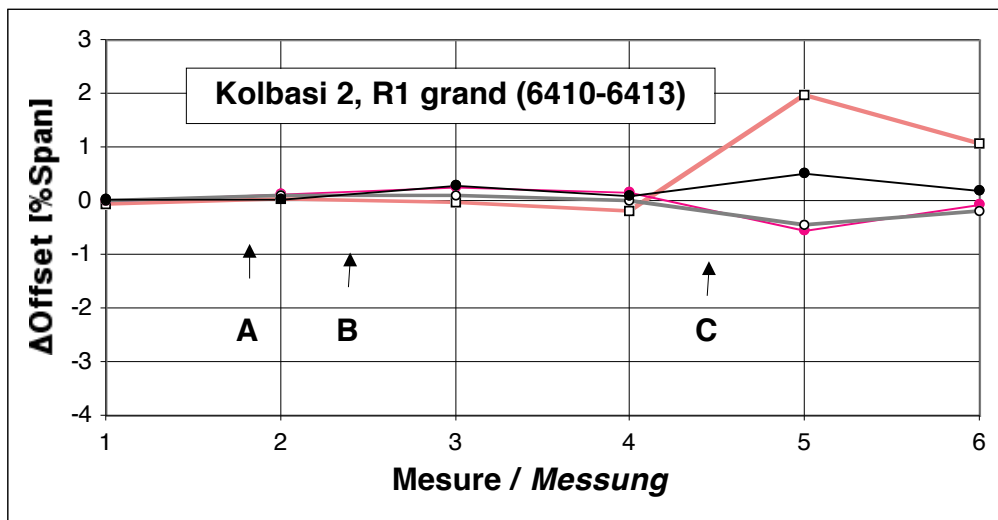


Figure 4–5. Evolution de l'offset (déviations par rapport à la valeur nominale) des capteurs Kolbasi 2 (gain 1^{er} étage élevé).

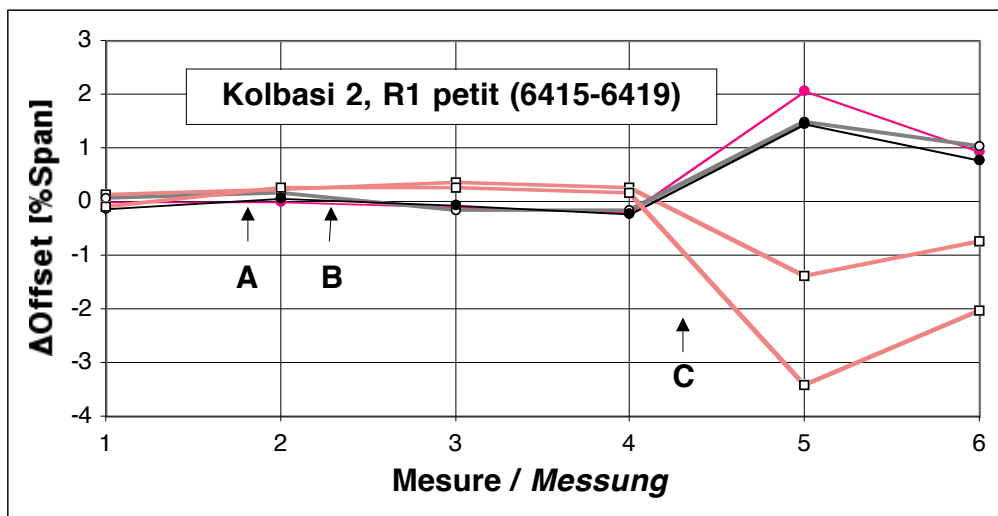


Figure 4–6. Evolution de l'offset t (déviations par rapport à la valeur nominale) des capteurs Kolbasi 2 (gain 1^{er} étage faible).

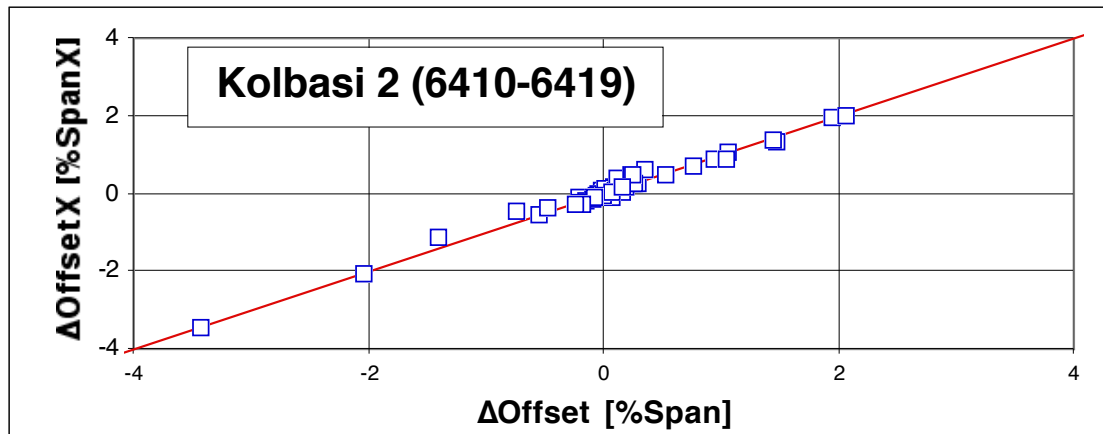


Fig. 4–7. Déviation de l'offset du 1^{er} étage des capteurs Kolbasi 2 (rapportée à son span), en fonction de la déviation rapportée au span de la sortie finale du capteur, pour toutes les mesures effectuées au cours des tests sur tous les capteurs Kolbasi 2.

5. Conclusions

Cette étude visait à comparer les différentes électroniques d'amplifications (DT400, Kolbasi 1 et Kolbasi 2), notamment leur ajustement et leur stabilité.

L'ajustement de l'électronique Kolbasi 1 (à un amplificateur) est assez similaire à celui de DT400. Les différences notables sont données ci-dessous.

- Il n'y a pas d'ajustement passif.
- La séquence utilisée pour l'ajustement du span doit être changée ; il faut ajuster d'abord la sortie sous charge, puis décharger, puis ajuster la sortie sans charge.
- La plage utile pour l'ajustement du gain est plus faible, au max. $V_{cc}/2$ moins la limite de saturation de l'amplificateur, ce qui est défavorable pour la précision.
- On peut augmenter et diminuer le span.
- Le type Kolbasi 1 fait intervenir une résistance de valeur très élevée (le numérateur du gain, composition DP 2051) ce qui est défavorable du point de vue de la stabilité dans le temps et vis-à-vis des influences extérieures. Il est préférable d'utiliser un circuit légèrement différent, où la rétroaction s'effectue sur une résistance de basse valeur en bas de la branche 1 du pont de mesure (fig. 1–1) plutôt que directement sur la sortie de cette branche.

Si on peut utiliser un amplificateur double bon marché de type LM358, l'électronique Kolbasi 2, à amplification en cascade, est de loin la plus simple et le plus facile à ajuster.

- Un ajustement passif n'est pas nécessaire.
- La séquence d'ajustement est la plus simple possible : offset, puis span.
- On peut ajuster avec la charge nominale.
- On peut augmenter et diminuer le span.
- L'amplification se faisant en cascade, les valeurs des résistances de numérateur de gain restent raisonnables.
- L'ajustement de TCO sur la sortie du 1^{er} étage permet d'éviter en principe les problèmes de saturation, même pour des ponts de mesure présentant des caractéristiques défavorables.

Bien entendu, il reste à étudier d'autres aspects tels que l'immunité contre le bruit, etc. Quant à la stabilité, la brasure tendre, et non tel ou tel type d'électronique, semble actuellement constituer le facteur limitant.